

DOI: 10.11973/jxgccl201509016

Incoloy825 合金 TIG 和 PAW 焊接接头耐晶间腐蚀性能的对比

徐学利¹, 王 纯¹, 毕宗岳^{1,2}, 杨耀斌², 张万鹏², 王 冬³

(1. 西安石油大学材料科学与工程学院, 西安 710065;

2. 国家石油天然气管材工程技术研究中心, 宝鸡 721008; 3. 宝鸡住金石油钢管有限公司, 宝鸡 721008)

摘 要: 采用 ASTM A262-E 标准方法对 Incoloy825 合金钨极氩弧焊(TIG)接头和等离子弧焊(PAW)接头进行晶间腐蚀试验, 通过腐蚀速率、背弯曲性能以及腐蚀形貌对两种焊接接头的耐晶间腐蚀性能进行了对比。结果表明: PAW 焊接接头的平均腐蚀速率为 $0.156\ 6\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, TIG 焊接接头的为 $0.229\ 3\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; 两种焊接接头经过背弯曲后, 拉伸面上均未发现裂纹; TIG 焊接接头紧邻熔合线的热影响区中晶粒较粗大, 晶界上有细小的碳化物析出; PAW 焊接接头紧邻熔合线附近区域的热影响区中晶粒长大不明显; PAW 焊接接头的晶粒尺寸比 TIG 接头的粗大。

关键词: Incoloy825 合金; 晶间腐蚀; 焊接接头; 钨极氩弧焊; 等离子弧焊

中图分类号: TG174.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2015)09-0068-04

Comparison of Intergranular Corrosion Resistance of TIG and PAW Welded Joints of Incoloy825 Alloy

XU Xue-li¹, WANG Chun¹, BI Zong-yue^{1,2}, YANG Yao-bin², ZHANG Wan-peng², WANG Dong³

(1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods, Baoji 721008, China;

3. Baoji-SMI Petroleum Steel Pipe Corporation, Baoji 721008, China)

Abstract: Intergranular corrosion test was carried on TIG and PAW welded joints of Incoloy825 alloy according to ASTM A262-E, and the intergranular corrosion resistance of the two kinds of welded joints was compared by corrosion rate, back bending property and corrosion morphology. The results show that the average corrosion rate of PAW and TIG welded joints were $0.156\ 6\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ and $0.229\ 3\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, respectively. No cracks were found on the tensile surface of the two kinds of welded joint after back bending. For the TIG welded joint, the grains located in the heat affected zone near to the fusion line were coarse, and fine carbides precipitated on grain boundaries. For the PAW welded joint, the grains located in the heat affected zone near to the fusion line had not obvious growth, and the grains size in PAW welded joint was larger than that in TIG welded joint.

Key words: Incoloy825 alloy; intergranular corrosion; welded joint; tungsten argon arc welding (TIG); plasma arc welding (PAW)

0 引 言

与一般碳钢、不锈钢及其它耐蚀合金相比, 镍基

合金在各种腐蚀环境中都表现出了优良的耐腐蚀性能^[1], 而且具有强度高以及塑、韧性好等优异的性能, 广泛应用于石油、化工、航空航天等领域^[2-3]。镍基合金中具有代表性的为 Incoloy825 合金, 它是由 Inconel 公司开发的一种添加了钼、铜和钛的镍-铁-铬固溶强化合金。由于含有镍、铬和钼等元素, 该合金具有良好的抗氯化物应力腐蚀、抗氧化以及抗点蚀的能力, 同时还具有抗中性和还原性酸和碱

收稿日期: 2014-09-27; 修订日期: 2015-07-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2013AA031303); 陕西省优势学科专项资金资助项目(ys37020203)

作者简介: 徐学利(1963—), 男, 陕西泾阳人, 教授。

通讯作者: 王纯

腐蚀的能力^[4-5]。对于 Incoloy825 合金而言,镍可以增加其抵抗 Cl^- 应力腐蚀开裂的能力^[4],铬元素可以使其表面形成稳定的氧化膜^[6-7],钼元素能提高其耐点蚀和晶间腐蚀的能力^[8-9],这三种元素的综合作用使得其在高达 550 ℃ 的高温下仍具有良好的力学性能。

迄今为止,尚未见 Incoloy825 合金焊接接头晶间腐蚀性能的相关研究报道。为此,作者对采用钨极氩弧焊(TIG)和等离子焊(PAW)两种工艺焊接的 Incoloy825 合金焊接接头进行晶间腐蚀试验,对比研究了这两种接头的耐晶间腐蚀性能。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

试验材料取自国内某公司提供的同批次 Incoloy825 镍基合金焊管,其母材的化学成分见表 1,焊接工艺参数见表 2。按照 ASTM A262-2002《测定不锈钢晶间腐蚀敏感性的推荐方法》E 法铜-硫酸铜-16%硫酸法(以下简称 ASTM A262 E 法)的标准取样。第一组焊接接头试样共 3 根,记为 1#~3# 试样,尺寸均为 75 mm×25 mm×2.5 mm,

均取自采用 TIG 工艺焊接的尺寸为 193 mm×2.5 mm× ϕ 12 000 mm 的焊管;第二组焊接接头试样共 3 根,记为 4#~6# 试样,尺寸均为 75 mm×25 mm×3 mm,均取自采用 PAW 工艺焊接的尺寸为 193 mm×3 mm× ϕ 12 000 mm 的焊管。两种焊接工艺均为单面焊双面成型。两组试样经机加工和研磨处理去除所有毛刺后,对根部焊缝依次进行粗磨、细磨和抛光处理,然后用丙酮、乙醇擦净表面的油污,清洗干净并吹干后放入干燥箱中进行干燥处理,备用。

按照 ASTM A262 E 法进行晶间腐蚀试验。在 700 mL 蒸馏水中溶解 100 g 无水硫酸铜(用搅拌棒搅拌至全部溶解),然后加 100 mL 硫酸(化学纯,密度为 1.84 g·cm⁻³),并用蒸馏水稀释至 1 000 mL;将铜粒置于锥形瓶底部,然后放入试样,再用足够量的铜粒覆盖试样的全部表面;然后注入上述配制的溶液,并使溶液完全浸没试样,并保证溶液体积和试样表面积之比至少为 8 mL·cm⁻²,装上回流冷凝器,然后通入冷却水,加热至微沸并保持 16 h 后取出试样(溶液达到沸点便开始试验周期计时),洗净、烘干。

表 1 Incoloy825 镍基合金焊管母材的化学成分(质量分数)

Tab.1 Chemical composition of Incoloy825 Ni-based alloy pipe base metal (mass)

Ni	Cr	Cu	Mo	Ti	C	Mn	Si	Al	P	S	Fe
39.42	20.64	2.00	2.84	0.89	0.018	0.56	0.43	0.13	0.024	0.005	余

表 2 焊接工艺参数

Tab.2 Welding process parameters

焊接工艺	电流/A	电压/V	极性	焊丝直径/mm	送丝量/(mm·min ⁻¹)	气体流量/(L·min ⁻¹)	等离子气流量/(L·min ⁻¹)
TIG	145	10.2	DCEP	1.2	220	15	—
PAW	150	30.2	DCEP	—	400	25	4.7

1.2 试验方法

采用 DMI-5000M 型扫描电镜观察试样腐蚀前后的显微组织,腐蚀剂为 20 g CuSO₄+100 mL HCl+5 mL H₂SO₄+80 mL 酒精;腐蚀前后的试样经水磨砂纸逐级打磨至光亮,再用去离子水清洗、丙酮去脂、乙醇脱脂,并干燥至恒温,然后采用 XS205-DU 型电子天平称量质量,并采用式(1)计算腐蚀速率;按 GB/T 4334.5-2000,采用 WE-30B 型液压式万能试验机对晶间腐蚀试样沿熔合线进行背弯曲试验,回转直径等于试样的厚度,弯曲角度为 180°。

$$v = m_0 - m_1 / (S \cdot t) \quad (1)$$

式中: v 为腐蚀速率,g·m⁻²·h⁻¹; m_0 为腐蚀前试样的质量,g; m_1 为除去表面腐蚀产物后的试样质量,

g ; S 为试样暴露在腐蚀介质中的表面积,m²; t 为腐蚀时间,h。

2 试验结果与讨论

2.1 宏观腐蚀形貌

由图 1 和图 2 可见,腐蚀前,两种焊接接头的表面均具有金属本色,且较为光亮;腐蚀后(清除腐蚀产物后),焊接接头表面发黑,黑色纹路沿轧制方向分布。

清除腐蚀产物前,热影响区被黑色腐蚀产物覆盖,腐蚀产物在热影响区积累,体积膨胀;清除腐蚀产物后,焊缝区和熔合区的腐蚀程度仅凭肉眼看不出大的区别。

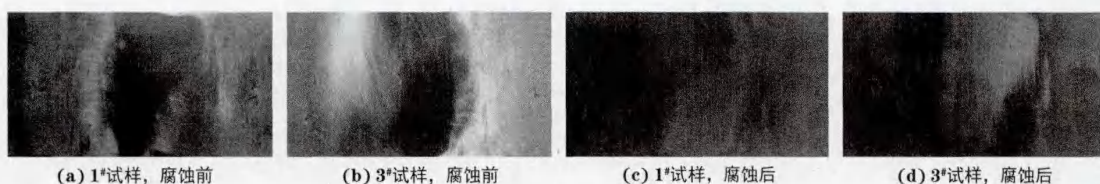


图1 TIG 焊接接头腐蚀前后的宏观形貌

Fig.1 Macrographs of TIG welded joints before and after corrosion: (a) 1# sample, before corrosion; (b) 3# sample, before corrosion; (c) 1# sample, after corrosion and (d) 3# sample, after corrosion

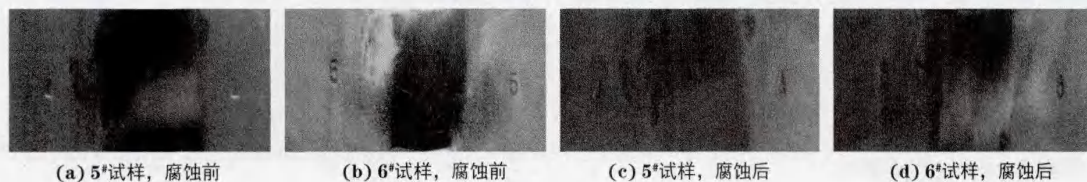


图2 PAW 焊接接头腐蚀前后的宏观形貌

Fig.2 Macrographs of PAW welded joints before and after corrosion: (a) 5# sample, before corrosion; (b) 6# sample, before corrosion; (c) 5# sample, after corrosion and (d) 6# sample, after corrosion

腐蚀前,1#,3#,5#,6# 试样母材的厚度分别为 2.48,2.44,3.12,3.10 mm,腐蚀后的厚度分别为 2.44,2.40,3.10,3.09 mm。可见,腐蚀后母材的平均壁厚有所减小。

2.2 腐蚀速率

由表3可见,TIG焊接接头的平均腐蚀速率为 $0.229\ 3\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,大于 PAW 焊接接头的 ($0.156\ 6\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)。可见,后者的耐腐蚀性能优于前者的。经敏化的两组试样在晶界处析出了大量富铬的碳化物($\text{CrFe})_{23}\text{C}_6$,在晶界附近形成贫铬区,该区与腐蚀介质接触后就会产生晶间腐蚀,从而导致试样质量减少。质量减少的越多,说明腐蚀程

表3 TIG 和 PAW 焊接接头的腐蚀速率

Tab.3 Corrosion rate of TIG and PAW

	welded joints						$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$
试样编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	
腐蚀速率	0.182 3	0.233 9	0.271 7	0.150 4	0.170 7	0.148 7	
平均值	0.229 3			0.156 6			

度越大。

2.3 背弯曲性能

背弯曲试验后,所有试样的拉伸面上都没有出现断裂,也未发现微裂纹,如图3所示。因此可判定两种焊接接头均没有发生晶间腐蚀。

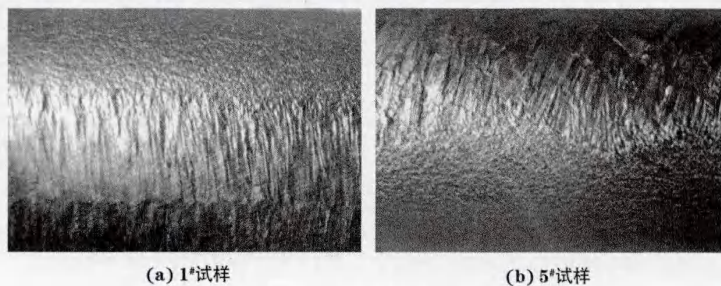


图3 不同试样背弯曲后拉伸面的宏观形貌

Fig.3 Macrographs of tensile surface of different samples after back bending: (a) 1# sample and (b) 5# sample

2.4 显微组织

由图4(a)可以看出,母材具有明显的轧制方向性(箭头为轧制方向),晶粒尺寸比较均匀,白色组织为奥氏体,黑色组织为铁素体,掺杂有少量碳化物;经硫酸铜-16%硫酸煮沸腐蚀后,只是沿着轧制方向有些腐蚀,其表面点蚀坑分布稀疏,而且腐蚀坑小且很浅,大部分地方未发生明显的腐蚀,母材表面有少

量白色腐蚀产物覆盖。

由图4(b~c)可以看出,TIG 焊接接头焊缝区和热影响区的腐蚀程度大于母材的,焊缝组织的晶界被腐蚀,焊缝区表面有少量的浅凹坑分布,并被少量黑色腐蚀产物覆盖。由于焊缝腐蚀后表面形成了多孔状形貌,其对外界光线的反射明显弱于母材部分的,故出现焊缝发黑的现象。但焊缝没有出现腐

蚀沟,晶粒未被腐蚀沟包围,组织呈阶梯状分布。在焊接接头中紧邻熔合线的热影响区中,晶粒比较粗大,晶界明显,晶界上有细小的碳化物析出,可见这一区域的晶间腐蚀倾向最大。

对比图4和图5可以看出,PAW焊接接头中的晶粒尺寸较TIG焊接接头的粗大。相关资料表

明^[11],在某种程度上,晶粒尺寸越粗大,晶界就相对越少,这样便越有利于材料避免发生晶间腐蚀。故而,PAW焊接接头发生晶间腐蚀的倾向较TIG焊接接头的小。

另由图5(b)可见,在PAW焊接接头中紧邻熔合线附近区域的热影响区中,晶粒长大的不明显。

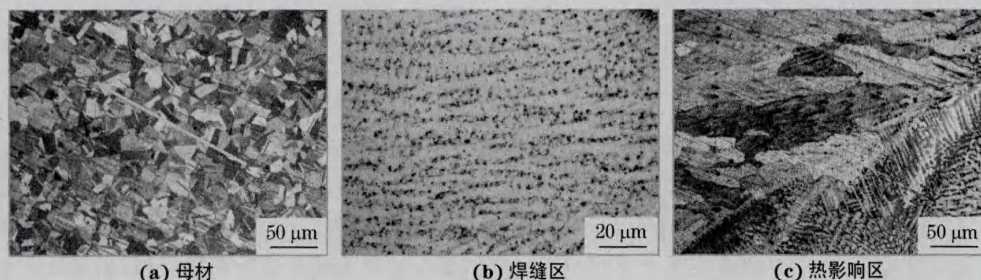


图4 TIG焊接接头晶间腐蚀后的SEM形貌

Fig.4 SEM morphology of TIG welded joint after intergranular corrosion: (a) base metal; (b) weld seam zone and (b) HAZ

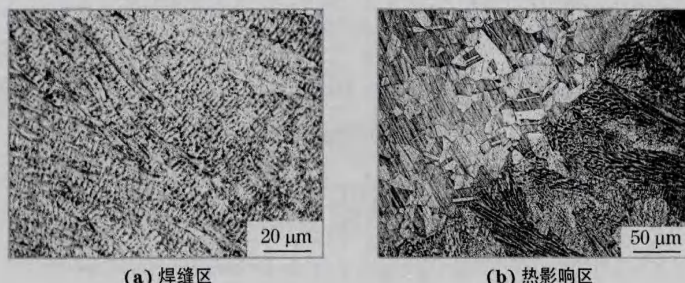


图5 PAW焊接接头晶间腐蚀后的SEM形貌

Fig.5 SEM morphology of PAW welded joint after intergranular corrosion: (a) weld seam zone and (b) HAZ

3 结论

(1) TIG和PAW焊接接头的平均腐蚀速率分别为0.229 3, 0.156 6 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,前者大于后者的。

(2) TIG和PAW焊接接头在硫酸铜-16%硫酸微沸腐蚀16 h后进行背弯曲试验,在拉伸面上未发现因晶间腐蚀而产生的裂纹,即两种焊接接头均具有较低的晶间腐蚀敏感性。

(3) TIG焊接接头紧邻熔合线的热影响区中,晶粒较粗大,晶界上有细小的碳化物析出;PAW焊接接头紧邻熔合线附近区域的热影响区中,晶粒长大不明显;PAW焊接接头的晶粒尺寸比TIG接头的粗大。

参考文献:

- [1] 戈磊,陈氏风,郑树启,等.高温高压 $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$ 环境中镍基合金825的腐蚀行为[J].腐蚀与防护,2009,30(10):708-716.
- [2] RAUL B R, PAUL C. Nickel alloys for corrosive environments [J]. Adv Mater Process, 2000,157(2):37-42.
- [3] YANG R C, WANG H, ZHENG L P, et al. Characteristics

and research trends of high performance Ni-base corrosion resistant alloys [J]. Mater Rev, 2001,15(11):21-23.

- [4] 张菽良,张红斌. Incoloy 825 耐蚀合金[J]. 四川冶金,2004,26(6):28-30.
- [5] 王成,巨少华,荀淑玲,等. 镍基耐蚀合金研究进展[J].材料导报,2009,23(2):71-76.
- [6] LE CANUT J M, MAXIMOVITCH S, DALARD F. Electrochemical characterisation of nickel-based alloys in sulphate solutions at 320°C[J]. J Nucl Mater, 2004,334(1):13-27.
- [7] YANG I J. Electrochemical study of nickel-based alloys in high temperature water chemistry[J]. Mater Chem Phys, 1997,49(1):50-55.
- [8] LI D G, FENG Y R, BAI Z Q, et al. Characteristics of CO_2 corrosion scale formed on N80 steel in stratum water with saturated CO_2 [J]. Appl Surf Sci, 2007,253(20):8371-8376.
- [9] REN C, LIU D, BAI Z, et al. Corrosion behavior of oil tube steel in simulant solution with hydrogen sulfide and carbon dioxide[J]. Mater Chem Phys, 2005,93(2):305-309.
- [10] ASTM A 262-2002 测定不锈钢晶间腐蚀敏感性的推荐方法[S].
- [11] 罗辉,项东,郭晓斐.奥氏体小锈钢晶粒度对晶间腐蚀速度的影响[J].山东建筑大学学报,2008,23(5):406-409.